CIRAD – CA – CALIM
EQP

Projet – Arachide de bouche / Diversification du Sénégal

Convention PAI – CNIA / CIRAD
PETF 1999/2000

Compte rendu de la mission d'appui au projet faite par P. CLOUVEL du CIRAD – CA Montpellier du 13 au 19 novembre 2000

Mission n° 5 – 99/2000

SOMMAIRE

A. Objet de la mission

B. Calendrier de la mission

C. Rapport de mission

1. Démarche globale de travail

1.1 Généralités sur les approches qualité au sein d'une filière

1.2 Approche méthodologique globale
- 1.1.1 Les outils
- 1.1.2 Les méthodes
- 1.1.3 Validation des méthodes
- 1.1.4 Expertise et formation

1.3 Les partenariats

2 Travaux à conduire en année 1

2.1 Réalisations

2.2 Principaux enseignements

3 Propositions d'outils et de méthodes d'analyse des données recueillies en 2000

3.1 Choix des modèles

3.2 Modèle de production de biomasse par un couvert végétal

3.3 Développement d'un module "température de la géocarposphère »

4. Conclusion

A. Objet de la mission

Cette cinquième mission d'appui au "Projet Arachide de Bouche / Diversification du Sénégal" s'inscrit dans le cadre des missions d'expertise et d'appui prévues dans le PETF n° 1 liant le CIRAD au CNIA pour la campagne 1999-2000.

Le but de la mission était d'apporter un appui scientifique pour l'évaluation des acquis de la première année d'expérimentation agronomique en conditions de culture irriguée et pluviale et de proposer un programme de travail.
Les entretiens préliminaires avec T. Brévault et B. M'bengue (CNIA) ont mis en évidence la nécessité de mieux définir la distribution des domaines d'étude entre les intervenants techniques du projet. En effet, l'accès du CERAAS à un financement direct par le CNIA en 2001 demande que soient clairement définis les domaines relatifs du CERAAS et du CIRAD dans les approches agronomiques, de même que ceux du CIRAD et de l'ISRA dans la production agricole. Pour répondre à cette attente, il est apparu nécessaire de réfléchir à une démarche globale de travail au sein de laquelle inscrire les interventions des différents organismes.
Une partie du temps de travail a donc été consacrée à cet exercice et le présent rapport comporte 3 parties relatives à :

- la démarche globale de travail dans un contexte de filière, assortie d'un calendrier prévisionnel de réalisation
- l'inventaire des données expérimentales recueillies
- des proposition de méthode pour le traitement des données recueillies lors des deux campagnes de culture.

B. CALENDRIER DE LA MISSION

13/11 • Arrivée à Dakar à 21 h 30.

14/11

- T. Brévault, animateur Cirad du projet : point sur l'avancement des actions de recherche et programmation de la mission.
- B. M'Bengue, coordonnateur du projet Cnia : démarche de travail et collaboration avec les partenaires (Isra en particulier).
- Déplacement au Cnra Bambey, M. Diack, agro-hydraulicien Cirad : inventaire et discussion autour des réalisations expérimentales.

15/11

- Rencontre avec A Ba, animateur de l'équipe Isra.
- Déplacement à la station Isra de Nioro : visite de l'essai maladies foliaires en cours de récolte.
- Entretien avec M I. Sow, directeur de la production à la Novasen : déroulement de la campagne agricole et axes de collaboration.
- Retour à Bambey, T. Brévault et M. Diack : discussions sur les méthodes de traitement des données et en particulier, proposition d'introduction du modèle de bilan de carbone.
- Retour Dakar.

16/11

- Déplacement Thiès, B. Sarr, D. Boggio et S. Braconnier, chercheurs Ceraas : premiers résultats de simulation du bilan hydrique, options techniques par rapport à l'utilisation du modèle, discussion sur les programmes de travail et les modalités d'intervention conjointe.
- Retour Dakar.

17/11

- Réflexion sur la démarche globale de travail, définition des outils et méthodes, inscription des travaux agronomiques et planification.
- Discussion sur les méthodes de travail (analyse des données), conclusion sur l'inventaire des données recueillies.

18/11

- Discussion sur les relations entre approches agronomique et technologique. Regard sur l'avancement des travaux en post-récolte.
- Rédaction sur la démarche globale de travail.

19/11

- Rédaction d'une plate-forme d'approche méthodologique de la démarche de travail à l'usage de la communication.

C. Rapport de mission

1. DEMARCHE GLOBALE DE TRAVAIL

1.1 Généralités sur les approches qualité au sein d'une filière

La qualité des produits s'élabore tout au long de la filière, depuis la parcelle de production jusqu'à la commercialisation du produit fini. Concernant l'arachide de bouche (ARB), on distingue un segment de production agricole, un segment de collecte et de transfert vers les unités de transformation, un segment de décorticage et de tri des graines en vue de l'exportation ou d'une transformation locale en produits alimentaires (pâtes, confiserie, *etc.*).
Les préoccupations du projet concernent l'ensemble des segments aboutissant à la graine décortiquée. Dans la démarche globale proposée, cinq questions principales sont posées :

1. Peut-on assurer la production d'arachide de bouche et de semences de qualité en culture irriguée ?
2. Peut-on gérer la qualité sanitaire de la production dans le bassin arachidier et la vallée du fleuve ?
3. Peut-on proposer une organisation cohérente de la collecte ?
4. Peut-on optimiser le revenu de la filière dans sa globalité ainsi qu'au niveau de chaque acteur ?
5. Peut-on certifier la qualité du produit fini 'arachide de bouche' ?

Agissant au sein d'une même filière, les acteurs sont liés par des intérêts financiers contradictoires. La pérennité de la filière repose alors sur un équilibre dans la distribution du revenu entre les différents acteurs. La recherche de cet équilibre ne passe pas uniquement par la négociation entre acteurs mais repose également sur des choix politiques ou économiques de la part des décideurs (état, banques etc.).
Répondre aux questions posées amène ainsi à définir des objectifs de mise au point d'un ensemble de techniques, d'outils d'aide à la décision et de méthodes de travail, à l'usage non seulement des acteurs de la filière (sensu stricto), mais également des décideurs.

- Pour le producteur, les attentes portent sur la fourniture de variétés adaptées aux exigences de la filière, les techniques culturales et post-culturales en conditions pluviales et irriguées pour l'obtention de produits ARB et de semences de qualité.
- Pour l'acheteur, les outils mis au point devront permettre d'évaluer la production et la distribution géographique de la qualité de la récolte. A partir des informations recueillies, des méthodes devront être développées pour décider de la destination des achats (arachide de bouche ou huilerie), du stockage ou du transfert des lots vers la transformation industrielle ou artisanale.
- Pour le transformateur, il s'agira de fournir des informations relatives à la qualité des lots afin d'optimiser le process (réglages des machines, rythmes de production, stockages intermédiaires, *etc.*) et d'en prévoir les coûts (main d'œuvre de tri en particulier).
- Pour les décideurs, on cherchera à développer un outil de simulation de la distribution des marges entre acteurs.

1.2 Approche méthodologique globale

Les outils sont destinés à fournir l'information de base nécessaire à la mise au point des techniques et méthodes qui devront être proposées aux acteurs ou décideurs. La mise au point des outils relève de la recherche dont le travail consistera à adapter aux conditions de l'étude des outils développés par ailleurs, s'ils existent, et en créer de nouveaux s'ils n'existent pas.
La mise en œuvre de ces outils relève d'une démarche de recherche-développement associant chercheurs et acteurs pour la conception de techniques et de méthodes de travail adaptées à leurs besoins.
Enfin, l'ensemble des connaissances acquises sur les techniques et méthodes constitue un domaine d'expertise qu'il convient de transmettre à la communauté des utilisateurs (formation, communications, publications).

1.2.1- Les outils

Outils agronomiques

Trois outils sont à développer :
- un ***modèle de bilan hydrique*** afin de quantifier l'état hydrique de la culture,
- un ***modèle de bilan de carbone*** afin d'estimer le rendement et
- un outil ***d'évaluation des fenêtres de contamination*** afin de prévoir les risques de présence d'aflatoxine dans la récolte.

Des références existent pour les deux premiers outils qu'il conviendra d'adapter aux conditions d'utilisation sénégalaises. La spécificité de l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'aflatoxine, amène à développer un outil original combinant une simulation de variables bioclimatiques (état hydrique et température de la géocarposphère) et un modèle de développement de l'arachide. Pour plus de détails techniques sur le contenu de ces outils, on se reportera au paragraphe n°3 du présent rapport.

Les outils économiques

Il s'agit ici de développer un outil ***d'évaluation des marges financières*** des acteurs à partir des coûts de production. L'objectif est d'apporter une aide supplémentaire à la décision permettant de valider économiquement des choix techniques. On s'intéressera plus particulièrement à certaines opérations clés, spécifiques de la filière :

- Qualité et stockage (durée et conditions) : peut-on décider de stocker un lot en vue par exemple d'opportunités commerciales liées à la fluctuation des cours du marché?
- Qualité et coûts de fabrication industrielle ou artisanale (rythmes, tri des écarts, *etc.*) : peut-on fixer un seuil de rentabilité (normes techniques) en vue de l'orientation d'un lot vers la bouche ou l'huilerie en fonction de sa qualité ? Peut-on transférer une partie des activités de transformation aux agriculteurs ?
- Traduction financière des choix techniques par l'évaluation des marges des acteurs.

1.2.2- Les méthodes

On entend par 'méthode' la mise en œuvre des outils dans le cadre de l'action ou de la prise de décision des acteurs, concernant :

- ***Le pilotage de l'irrigation***, pour la production d'arachide de bouche et de semences de qualité. On recherchera des trajectoires hydriques du sol permettant d'optimiser la durée du cycle et la qualité physique de la production selon les conditions de culture.
- ***L'évaluation du rendement et de la qualité*** au niveau de la parcelle cultivée. On se propose de mettre en œuvre le modèle de bilan de carbone et l'outil d'évaluation des fenêtres de contamination par l'aflatoxine en cours de culture, élargi aux conditions de séchage.
- ***La gestion de la collecte*** : prévision de fonds de commercialisation pour la campagne, choix et orientation des lots, *etc.* Ces points amèneront à considérer une dimension spatiale du rendement et de la qualité à l'échelle du centre d'achat, du secteur ou encore de la région.
- ***La validation économique des choix techniques.*** La gestion des flux de produits amènera à intégrer les dimensions techniques et financières pour l'édiction de règles de décision portant sur le stockage, l'orientation des lots achetés et les opérations de transformation.
- L'organisation de la filière pour laquelle nous serons amenés à envisager ***l'aptitude des exploitations agricoles à accueillir l'innovation et gérer la qualité*** sous l'angle de la faisabilité technique et économique (utilisation de l'outil d'évaluation des marges financières)

1.2.3- Validation des méthodes

A ce stade de la démarche, les méthodes proposées devront être testées en conditions réelles, en relation étroite avec les acteurs concernés. Cette mise en interaction avec les acteurs doit permettre d'amener les méthodes au stade d'opérationnalité.
On traitera alors des problèmes :

- de gestion de la parcelle en conditions de culture irriguée, intégrant le type de sol, la topographie et l'équipement des exploitations. A ce titre, on identifiera les couples **sol-technique** d'irrigation (goutte à goutte, aspersion et gravité) permettant de respecter les objectifs de qualité de la production. Des cartes pourront alors être établies pour préciser les zones de production potentielles d'ARB dans la vallée du fleuve.
- de gestion de la qualité au niveau des exploitations agricoles : techniques de production (culture et séchage) et, éventuellement de transformation des produits, en relation avec le fonctionnement des exploitations.
- de gestion de la collecte, mettant en œuvre l'ensemble des règles de décision sur les achats, le stockage et le transfert des produits au niveau d'une région agricole.

Le tableau ci-dessous donne une estimation du calendrier de réalisation des travaux sur 4 ans.

TABLEAU I. CALENDRIER PREVISIONNEL DE REALISATION.

Année	Les outils	Les méthodes	Validation des méthodes
1	- Bilan hydrique - Bilan carboné - Fenêtres contamination - Marges financières	- pilotage de l'irrigation - évaluation du rendement et de la qualité - validation économique des choix techniques	
2	- Bilan hydrique - Bilan carboné - Fenêtres contamination - Marges financières	- pilotage de l'irrigation - évaluation du rendement et de la qualité - gestion de la collecte - validation économique des choix techniques - aptitude des exploitations à gérer la qualité (enquêtes)	- gestion de la parcelle irriguée (aspersion, raie)
3	- Fenêtres de contamination	- pilotage de l'irrigation - évaluation du rendement et de la qualité - gestion de la collecte - validation économique des choix techniques	- gestion de la parcelle irriguée (g à g, aspersion, raie) - gestion de la qualité au niveau des exploitations - gestion de la collecte : test de règles de décision
4			- gestion de la parcelle (ensemble des techniques culturales) - gestion de la qualité au niveau des exploitations - gestion de la collecte : test de règles de décision - zonage de la culture ARB dans la vallée du fleuve Sénégal - certification des produits sur le plan sanitaire

1.2.4- Expertise et formation

C'est le stade ultime de la démarche, dont le contenu dépendra des acquis intermédiaires.

1. 3 – Les partenariats

Trois organismes de recherche agronomique interviennent dans la démarche, ainsi que l'ITA plus spécialement chargé de la métrologie de la qualité sanitaire finale des produits. En fonction de la compétence des équipes, on peut distinguer trois niveaux d'approches complémentaires :

- Le CERAAS développe des compétences dans les domaines de la création variétale, de la physiologie végétale, de la bioclimatologie et de la modélisation.
- L'ISRA, au travers d'un réseau de stations et de chercheurs, s'intéresse à la variabilité des pratiques liées aux conditions de milieu : variétés et zone de production, sol et fertilisation, maladies (dont A. flavus responsable de la production d'aflatoxine) et protection des cultures, revenu des agriculteurs et système de production.
- Le CIRAD, s'intéresse aux processus d'élaboration et d'évolution de la qualité tant physique que sanitaire tout au long de la filière. A ce titre, la qualité finale d'un lot de graine est évaluée au travers de l'ensemble du fonctionnement de la parcelle cultivée, de l'exploitation agricole (aptitude à gérer la qualité), de la collecte et de la transformation des produits.

Par rapport à la partition des travaux de recherche proposée ci dessus, la sensibilité des organismes amène à un centre de gravité des travaux déplacé vers la mise au point des outils pour le CERAAS, des méthodes pour le CIRAD et la validation des méthodes pour l'ISRA.

Toutefois, la mise en œuvre de la démarche autour de la qualité confère un rôle fédérateur au CIRAD. C'est dans cet esprit que les expérimentations conjointes CIRAD-CERAAS ont été menées en 2000. Ainsi, les documents scientifiques qui pourront être rédigés à l'issue des deux premières campagnes d'expérimentation seront co-signés ; le CERAAS ayant la préséance sur les aspects liés à la bioclimatologie, la modélisation et le CIRAD sur le fonctionnement du peuplement en relation avec l'alimentation hydrique (précocité, état hydrique des fruits) et les maladies foliaires.

2. TRAVAUX CONDUITS EN ANNEE 1

Les travaux en agronomie conduits en 2000 sur la vallée du fleuve et dans le bassin arachidier visaient à mettre au point des outils et méthodes de compréhension de l'élaboration du rendement et de la qualité de la récolte.

2.1 Réalisations

Quatre expérimentations ont été réalisées *(Tab. II)*.

Tableau II. Contenu technique et objectifs des expérimentations agronomiques conduites en 2000.

Intitulé	Localisation	Modalités	Objectifs
I : Alimentation hydrique et qualité*	*Gie Agrinord* Région du Fleuve	- 2 variétés** - 8 traitements hydriques - goutte à goutte	1 : calibrage modèle bilan hydrique 2 : calibrage modèle bilan énergétique 3 : modèle de développement fructifère 4 : rendement, précocité et qualité
II : Alimentation hydrique et qualité*	*Isra* Bambey	- 2 variétés** - 5 traitements hydriques - aspersion + abris	1 : calibrage modèle bilan hydrique 2 : calibrage modèle bilan énergétique 3 : modèle de développement fructifère 4 : rendement, précocité et qualité
III : Maladies foliaires	*Isra* Nioro	- 2 modalités de protection - 3 traitements hydriques	1 : interactions état hydrique – maladies 2 : hypothèse dégâts foliaires / efficience de conversion du rayonnement
IV : Variabilité du rendement et de la qualité	*Novasen* Région de Kaolack	- enquête agronomique sur 45 parcelles de paysans - 6 traitements (fertilisation, protection fongicide et insecticide, désherbage) - 2 traitements (mode séchage)	1 : diagnostic et hiérarchisation des facteurs de variabilité du rendement et de la qualité 2 : identification des facteurs influant l'efficience de conversion du rayonnement 3 : impact des conditions de séchage sur la qualité de la récolte

* : dans l'essai I, les traitements hydriques consistent principalement à induire une réduction de la disponibilité en eau croissante en fin de cycle. Dans l'essai II, on s'est intéressé à l'effet de stress hydriques précoces sur les relations entre transpiration et état hydrique du sol (rôle éventuel d'un ajustement osmotique).

** : les variétés retenues sont cv. Fleur 11 (Spanish) et cv. GH 119-20 (Virginia). Ces variétés, fournies par l'Isra, sont inscrites au catalogue variétal du Sénégal.

Expérimentations I et II

L'essai I a été semé le 11 mars. Les durées de cycle observées habituellement en conditions pluviales, 90 j pour cv Fleur 11 et 110 j pour cv GH 119-20, ont été allongées respectivement de 33 j et 45 j pour un cumul de degré-jours de 1500 et 1800 °J (base 11). L'essai II a été semé le 12 juillet et récolté respectivement les 9 octobre et le 2 novembre pour cv Fleur et cv GH 119-20, soit 90 et 114 jours de cycle.

Des données bihebdomadaires ont été recueillies concernant la date de floraison et le développement des fruits, position par position. Par rapport à la gestion de la précocité, les données de croissance et de développement des gousses, position par position, permettront de statuer sur les vitesses de mise en place de la production et de l'accumulation de matière sèche. Grâce aux notations de couleur du parenchyme interne des gousses, on dispose également d'indications sur la progression du stade de maturité des gousses au sein de la plante.
Les évolutions de température de la géocarposphère ont été mesurées au midi solaire, de façon bihebdomadaire, durant la période de développement des fruits. Des mesures ont également été réalisées à l'échelle de la journée.

Expérimentation III
L'essai a été semé le 25 juillet et récolté le 15 novembre. La réalisation d'un semis tardif devait assurer une fin de cycle sèche. Or une pluie de 70 mm a été enregistrée le 21 octobre, nuisant ainsi à l'obtention d'un stress hydrique drastique sur le témoin non irrigué. D'importants dégâts de cercosporiose ont toutefois pu être observés sur le traitement non protégé.

Expérimentation IV
A partir de l'analyse de la variabilité des conditions climatiques, de rendement et de qualité mise en évidence à partir des données de la Novasen sur 10 ans, 3 secteurs ont été choisis : Medina Sabakh pour la situation la plus arrosée, Kaffrine pour une situation plus sèche et N'doffane pour une situation intermédiaire. Afin d'augmenter la variabilité climatique, trois dates de semis ont été choisies *a posteriori* selon les pluies enregistrées sur chacun des sites : du 29 juin au 24 juillet sur l'ensemble du dispositif. L'ensemble du dispositif d'enquête porte sur 45 parcelles. Parmi celles-ci, 9 sites ont été l'objet de traitements supplémentaires portant sur la fertilisation (6-20-10), l'enherbement, le traitement des ravageurs (sol et feuillage) et des maladies foliaires.
Les observations réalisées mettent en évidence une variabilité de développement végétatif d'un site à l'autre ainsi que d'un traitement à l'autre pour un même site. Par rapport à l'outil d'analyse basé sur le calcul d'un bilan de carbone, on a donc bien matière à discuter de l'effet du LAI ainsi que de l'efficience de conversion du rayonnement sur l'accumulation de biomasse. Cependant, l'observation des gousses à la récolte met en évidence un gros problème de pureté variétale des semences distribuées aux paysans ; des différences de port et de développement pourraient être alors induits par des problèmes de pureté variétale, source prévisible d'incertitude pour l'interprétation des résultats.

2.2 Principaux enseignements (au 20/11/2000)

- Les rendements obtenus dans la gamme de régimes hydriques explorée varient respectivement de 1600 à 3900 et de 1200 à 4600 kg/ha base gousse pour cv Fleur 11 et cv GH 119-20. De manière générale, le rendement est expliqué par le nombre de gousses par plant. Il semble donc que l'alimentation hydrique joue un rôle important dans l'élaboration du nombre de gousses et vraisemblablement, mais ceci reste à approfondir, sur la durée du cycle de production.

- Les suivis de température du sol dans l'horizon 0-5 cm mettent en évidence une importante différence de température selon les traitements hydriques, l'heure de la journée et la période du cycle. Le maximum de température est atteint entre 14 et 19 h. Durant cette période, des écarts moyens de 6°C ont pu être enregistrés entre les traitements hydriques extrêmes. Alors que le traitements le plus « sec » conduit à une température maximum de 34°C, le traitement le plus « humide » conduit à une température maximum de 29°C. Il semble ainsi avéré que l'irrigation permet de contrôler la température de la géocarposphère. Sachant que la fenêtre de sensibilité se situe entre 27 et 34°C, il paraît donc pertinent de prendre en compte ce facteur, à la fois pour la mise au point d'itinéraires techniques et l'évaluation des risques de contamination par l'aflatoxine.

- Les premières tentatives de simulation du bilan hydrique font apparaître la nécessité d'améliorer deux points du modèle tel qu'il a été construit par Lecoeur (1995). Le premier porte sur le volume de sol exploré par les racines ; il semble en effet que l'adoption d'un profil homogène sur les 90 cm de profondeur explorée surestime fortement le stock d'eau simulé. Une solution consiste à

affecter un coefficient d'exploration égal à 1 sur les 40 premiers centimètres puis uniformément dégressif de 40 à 90 cm en forme de tronc conique à optimiser. Le second porte sur la prise en compte de la sénescence foliaire dans l'estimation de la transpiration à partir du LAI.

3. PROPOSITION D'OUTILS ET DE METHODES D'ANALYSE DES DONNEES RECUEILLIES EN 2000

3.1 Choix des modèles

Le modèle ARHABY développé au Sénégal il y a plusieurs années (Annerose, 1990), repose principalement sur la satisfaction des besoins en eau de l'arachide pour simuler le rendement. En conséquence, avec ce modèle, il n'est pas possible de traiter des situations de restrictions volontaires de la disponibilité en eau en vue d'atteindre un objectif de qualité physique de la production. De plus, l'étude porte sur l'ensemble des facteurs impliqués dans la variabilité du rendement et de la qualité. Des modèles mécanistes permettant de simuler la croissance de l'arachide existent, cependant leur mise en œuvre dans le cas de parcelles paysannes gérées en conditions sub-optimales d'alimentation hydrique, minérale et sanitaire requerrait un effort important de calibrage et d'adaptation incompatible avec le calendrier du projet. Pour contourner la difficulté de simuler la croissance des plantes, nous aurons donc recours à l'utilisation de données mesurées. La donnée mesurée à la parcelle est la surface foliaire (*Leaf Area Index* = LAI) et on considérera de manière schématique le peuplement comme un capteur de rayonnement solaire et un moteur de transpiration dépendant de la surface et de l'état de fonctionnement du feuillage. L'ajustement à une courbe de croissance des données mesurées permet alors de simuler sur un pas de temps quotidien le fonctionnement hydrique et photosynthétique de la culture. Dans un premier temps, on s'appuiera sur des données mesurées directement à la parcelle, mais dans le futur, on peut penser utiliser l'interprétation de l'imagerie aérienne.

Pour le pilotage de l'irrigation, on aura recours au modèle de ***bilan hydrique*** construit par Lecoeur (1999). Dans ce modèle, le LAI intervient comme un élément de perte d'eau du sol par transpiration, en plus de l'évaporation du sol, du drainage et du ruissellement. La transpiration est modulée en feed-back par l'état hydrique du sol simulé.

Pour l'évaluation du rendement, on s'intéressera au ***bilan carboné*** en utilisant le modèle de Monteith (1977, voir Annexe). Ce modèle permet de simuler la biomasse accumulée au cours du cycle de production à partir de données de rayonnement, du LAI et de l'efficience de conversion du rayonnement. Cette efficience dépend de l'état de fonctionnement du feuillage, en relation avec l'état hydrique du sol simulé grâce au modèle de bilan hydrique *op. cit.*

Pour l'évaluation des risques de présence d'aflatoxine dans la récolte, on s'intéressera à l'existence éventuelle de «***fenêtres de contamination*** » en cours de culture, puis pendant les opérations de séchage. La bibliographie réalisée sur l'épidémiologie de la contamination des graines par l'aflatoxine met en avant le rôle de trois facteurs déterminants : l'état hydrique du sol, la température de la géocarposphère et le stade de développement des fruits. Pour prendre en compte ces facteurs, trois modules sont envisagés : le bilan hydrique, le bilan d'énergie pour la simulation de la température du sol dans l'horizon 0-5 cm (géocarposphère) et le modèle de développement fructifère de la plante. D'autre part et toujours dans l'objectif de concevoir des outils les plus simples possibles, on considérera en premier lieu que les données concernant l'état hydrique de la plante entière, la température de la géocarposphère et l'état de développement des fruits, suffisent pour appréhender l'existence des « fenêtres de contamination ». On testera cette hypothèse en gardant à l'esprit qu'il sera éventuellement nécessaire de simuler l'état hydrique de l'horizon 0-5 cm et des fruits formés.
De la même manière, pour intégrer les conditions de séchage dans le modèle, on testera d'abord l'hypothèse que seules les gousses immatures (les plus humides) sont susceptibles d'être contaminées en cours de séchage. Dans le cas contraire, il faudra développer un modèle physique de cinétique de séchage des gousses dépendant notamment des conditions climatiques et des techniques utilisées.

3.2 Modèle de production de biomasse par un couvert végétal

3.2.1 : modèle de référence

D'après Monteith (1977, voir Annexe), la production de biomasse par un couvert végétal se modélise de façon simple par l'équation suivante :

BIOMASSE PRODUITE = EB * EA * EC * RG

Avec :

Rg = Rayonnement global, exprimé en Mégajoules par m²
Eb = Efficience biologique, exprimée en g de MS par Mj. Eb représente l'efficacité qu'a le couvert végétal à convertir les mégajoules d'énergie absorbée sous forme de rayonnement solaire, en gramme de matière carbonée, la biomasse.
Ec = Efficience climatique. En France, on admet que Ec = 0,48. En multipliant Rg par Ec, on obtient la fraction de rayonnement efficace pour la photosynthèse. C'est le PAR (Rayonnement photosynthétique Actif).
Ea = Efficience d'absorption du rayonnement. C'est la fraction du PAR qui est absorbée par le couvert végétal. Ainsi, on a la quantité d'énergie (PAR absorbé) qui rentre dans le système modélisé en multipliant Ea par le PAR. Ea est une fonction du LAI : $Ea = a*(1-e^{-k*LAI})$, où a est fonction de la réflectance des feuilles et k fonction de la géométrie du couvert.

A partir de ce modèle, Métral (1998, voir Annexe), propose une méthode permettant de simuler l'accumulation de biomasse sur une légumineuse à graines à partir de données météorologiques et de mesures du LAI en cours de culture. En conditions de culture françaises, Ec est considéré comme constant (Ec = 0.48). Une valeur appropriée aux conditions tropicales est donc à rechercher dans la littérature ou à calculer à partir des données de terrain. Dans la méthode proposée, Ea est directement mesuré (Li-cor), alors que dans les expérimentations conduites au Sénégal, seul le LAI est relevé. Un ajustement devra donc être réalisé à partir des données de LAI pour déterminer la courbe d'évolution du LAI dans un premier temps et calculer Ea en fonction du temps. Parmi les paramètres considérés, « a » varie peu d'une culture à l'autre et une valeur de 0,95 est généralement admise ; par contre « k » varie d'une culture à l'autre. Considérant la diversité structurale des types spanish ou virginia, il est vraisemblable que « k » varie également selon le type et le port (érigé, semi-érigé, rampant) du cultivar considéré. Eb varie en fonction du stade de développement de la plante, de l'état de fonctionnement du feuillage. L'entrée en sénescence des feuilles agées, l'état hydrique et minéral de la plante et les maladies foliaires vont affecter Eb.

Des références existent sur l'efficience d'interception du rayonnement par l'arachide (Sinclair et al., 1993). Les résultats de ce travail et les données expérimentales recueillies en 2000 permettent de disposer de références pour les courbes d'évolution de Ea et Eb en conditions de fonctionnement non limitantes (Ea_{max} et Eb_{max}). Sur pois, Métral (1998) montre qu'il est possible de prendre en compte l'état hydrique des peuplements en modulant Eb par des valeurs de FTSW simulée (Eb_{H2O}). Les données recueillies lors des essais conduits à Bambey et sur le fleuve Sénégal doivent permettre de paramètrer le modèle en conditions de fonctionnement minéral non limitant et dans la gamme d'états hydriques explorée

3.2.2 Mise en œuvre du modèle des bilans hydriques et Carbonés pour l'interprétation des essais

Les conditions de milieu et les techniques de production rencontrées au Sénégal amènent à prendre en compte des facteurs rarement pris en compte dans les modèles développés en conditions froides. Or la rapidité des phénomènes de sénescence foliaire en relation avec les fortes températures, les faibles niveaux de fertilisation, l'absence de protection phytosanitaire influent significativement sur le

fonctionnement des plantes dans les conditions sénégalaises. Dans le modèle de bilan carboné, on peut considérer qu'au même titre que l'alimentation hydrique, ces facteurs affectent l'efficience de conversion du rayonnement. On gardera toutefois à l'esprit que cette solution simple ne permet pas d'aborder les interactions entre facteurs (exemple : état azoté et résistance stomatique par rapport au stress hydrique).

L'enquête agronomique menée dans le bassin arachidier a pour but de hiérarchiser les contraintes susceptibles d'expliquer la variabilité du rendement et de la qualité physique et sanitaire des graines produites. On a vu que le facteur hydrique pouvait être pris en compte dans le modèle de production de biomasse. Restent l'alimentation minérale et l'impact des ravageurs et des maladies foliaires. Pour ces dernières, l'angle d'attaque de l'étude consiste à considérer l'impact de la maladie en terme d'altération du fonctionnement foliaire. En effet, dans le cas de saison des pluies humides en fin de cycle, les maladies foliaires représentent un élément de limitation du rendement et, vraisemblablement un facteur de contamination des gousses par l'aflatoxine. Par contre, l'effet dépressif sur la transpiration peut représenter un facteur d'adaptation intéressant en cas de stress de fin de cycle. Cette idée repose sur l'hypothèse que les dégâts affectent principalement le fonctionnement des feuilles sans impact majeur sur les fonctions physiologiques de transfert et d'utilisation des assimilats pour le développement des fruits. C'est cette hypothèse qu'il convient de tester au travers du bilan de carbone.

La méthode d'analyse proposée repose sur la comparaison de la biomasse observée sur le terrain avec une biomasse simulée à partir de diverses hypothèses sur Ea et Eb.
On appellera « potentiel climatique » la biomasse calculée à partir de Ea_{max} et Eb_{max} pour une variété donnée. On appellera « potentiel de la parcelle » la biomasse calculée à partir du LAI observé (Ea_{obs}) et de Eb_{max}. On s'intéressera ensuite à simuler l'impact de l'alimentation hydrique sur la biomasse en considérant Ea_{obs} et Eb_{H20}.
L'écart entre les diverses biomasses simulées permet de statuer sur le poids respectif des facteurs testés. L'écart entre les biomasses observée et simulée en intégrant le facteur hydrique permet de quantifier l'impact cumulé de l'alimentation minérale, des maladies et des déprédateurs.
Les données de l'essai cercosporiose, conduit à Nioro, permettent d'aller plus loin dans la démarche. Si on prend comme hypothèse qu'en conditions contrôlées de ravageurs et de fertilisation minérale, seules les relations entre état hydriques et maladies influent sur le système, on peut alors mettre en regard les notations de dégâts avec l'Eb observé au cours du cycle.

3.3 Développement d'un module « température de la géocarposphère »

Les données de température de l'horizon 0-5 cm du sol relevées dans la vallée du fleuve et à Bambey varient en fonction des conditions de culture ainsi qu'au cours de la journée. Les courbes d'évolution en cours de journées présentent un plateau de température maximale entre 14 et 19 h, celle-ci variant de 25 à 36°C selon les parcelles. Comparée à la gamme correspondant à la production d'aflatoxine par le champignon (27-34°C), force est de constater que certaines parcelles ne remplissent pas les conditions de température pour que le champignon métabolise de l'aflatoxine. Ce constat amène à prendre en compte la température dans le modèle d'estimation des risques de contamination. Le problème se pose alors de la voie à adopter pour simuler la température de l'horizon 0-5 cm dans lequel les gousses se développent (géocarposphère).
Des modèles existent pour simuler la température de l'horizon de surface en fonction du climat, des caractéristiques thermiques et de l'état hydrique du sol ainsi que l'état du couvert végétal. Le degré d'exigence vis-à-vis des sorties conditionne la complexité des modèles en terme de données d'entrée, du nombre de fonctions et paramètres nécessaires pour représenter le système. Dans le cas de l'étude, on s'intéresse à l'estimation de la température de l'horizon de surface alors que les gousses sont en formation. Dans des conditions satisfaisantes de densité (nombre de plants/m²) et de développement des plants, cette phase se déroule en condition de couvert fermé. D'autre part, l'existence d'un plateau de température en cours de journée peut s'interpréter en première approximation comme un indice de l'existence d'un équilibre thermique du système considéré en cours de journée, à partir de 14h et jusqu'à 18-19h. Par rapport à l'estimation des risques de production d'aflatoxine, on s'intéresse à la

durée d'exposition à des températures comprises entre 27 et 34°C. Cette durée peut être nulle si le plateau n'atteint pas 27°C.
Les données recueillies doivent, dans un premier temps, permettre d'estimer le niveau de complexité du modèle à considérer. La démarche consiste à déterminer le nombre de paramètres nécessaires à prendre en compte pour accéder à la valeur du plateau thermique et à la durée d'exposition à la contamination.
D'ores et déjà, en plus des données climatiques journalières, on sait estimer l'état hydrique du sol sur la profondeur explorée par les racines. L'état hydrique du sol conditionne à la fois les échanges thermiques au sein du système et les phénomènes de transpiration et de régulation stomatique. Sous réserve de conditions d'application en condition de couvert fermé (LAI>3), on peut tester l'hypothèse que la température maximum de l'air, le LAI, et la FTSW rendent partiellement compte de la température du plateau thermique (op. cit.) à partir d'une simple régression. De la même manière, on peut considérer le degré de précision obtenu par le calcul de la durée d'exposition de la géocarposphère à des températures supérieures à 27°C, à partir de la valeur du plateau et de la FTSW comme facteur d'inertie thermique du système.
Dans la gamme de traitements étudiée, les températures correspondant au plateau varient de + ou - 3 °C. Le niveau de précision recherché doit donc être largement en deçà de cette valeur. S'il s'avère nécessaire d'utiliser une représentation plus complexe du système, on s'intéressera alors au modèle de bilan énergétique simplifié proposé par Noilhan et Planton (1989).

4. CONCLUSION

Un effort important a été porté en première année sur les outils et méthodes. Les données recueillies permettent de mettre au point les modèles de bilan hydrique et carboné et de proposer des méthodes de pilotage de l'irrigation.

Les résultats obtenus en culture irriguée de contre-saison froide en utilisant la technique de goutte à goutte montrent d'ores et déjà qu'il est techniquement possible de produire des semences et de l'ARB de qualité à partir de la variété Fleur 11 vulgarisée au Sénégal (question n°1); sur les parcelles les plus arrosées, et moyennant un temps de fonctionnement de la culture de 125 jours, des rendements de 4,6 (base coque) ont été obtenus, sans altération de la qualité physique des graines. Pour des semis réalisés en début de mars, les durées de cycle amènent à récolter Fleur 11 à la fin du mois de juin. Pour la variété GH 119-20 par contre, le plus fort rendement observé (4 t/ha) s'accompagne d'une récolte à la fin du mois de juillet. Or, les risques de pluie commencent à devenir importants dans la première quinzaine de juillet, ce qui interdit la production de GH 119-20 dans ces conditions. Pour résoudre ce problème, l'imposition d'une restriction de l'alimentation hydrique en cours de floraison devrait permettre de raccourcir le cycle de production de GH 119-20 au détriment du rendement, de façon à éviter les risques de pluies sur la récolte en juillet. L'analyse de la qualité des graines et de la marge d'exploitation permettront de statuer sur l'opérationnalité de la méthode.

Toujours en conditions de culture irriguée, l'importance des écarts de température du sol relevé entre les parcelles stressées et celles bien alimentées en eau (6°C) ouvre le champ à un nouvel aspect du pilotage de l'irrigation. En plus de la maîtrise de la durée de cycle et de la qualité physique des graines, on peut songer attribuer au pilotage de l'irrigation des objectifs d'évitement des plages thermiques permettant à A. flavus de produire de l'aflatoxine. Cet aspect serait particulièrement intéressant à développer s'il est un jour question de certifier des pratiques de production vis-à-vis de la qualité sanitaire des graines (questions n° 2 et 5).

En culture pluviale, après de nombreuses années déficitaires sur le plan de l'alimentation hydrique, les pluies de 1999 et 2000 ont été régulières et abondantes jusqu'au mois d'octobre. L'hypothèse couramment avancée de l'existence de stress hydriques en fin de cycle ne tient donc pas pour expliquer l'abondance de la toxine observée dans les récoltes en 1999. A la suite de discussions avec l'encadrement de la NOVASEN, l'équipe CIRAD s'est intéressée au rôle de la cercosporiose dans le fonctionnement des peuplements d'arachide. En effet, il semble qu'en raison de la chute précoce des feuilles, les plants ne soient plus en mesure d'assurer le développement des derniers fruits formés qui deviennent alors sensibles aux attaques d'A flavus. Un dispositif spécifique a donc été mis en place, de façon à intégrer les maladies foliaires dans l'outil d'évaluation des risques de contamination par l'aflatoxine (question n°2).

Sur le plan de la communication scientifique enfin, 5 publications peuvent être envisagées :

1 Trajectoire hydrique et qualité physique des produits : ce papier, présentant l'outil de modélisation du bilan hydrique dans les méthodes aurait pour propos de montrer le rôle de l'alimentation hydrique sur le nombre/m² et le poids moyen des graines des 2 variétés étudiées (CERAAS, CIRAD). L'application porte sur l'approche d'objectifs de rendements, compatibles avec la qualité physique des graines, en conditions irriguées.

2 Trajectoire hydrique et précocité : ce papier aurait pour propos de montrer le rôle de l'alimentation hydrique sur la durée du cycle de la culture, au travers de la durée de l'émission de gynophores et de la cinétique de maturation de la population de fruits présents (couleur du parenchyme interne comme indicateur de maturité). La production de semences dans un temps de culture limité (système de culture) est une application de cette étude. (CIRAD-CEERAS)

3 Etat hydrique plante entière et état hydrique des fruits en formation : ce papier, présentant le modèle de développement fructifère dans les méthodes, a pour objet de mettre en regard l'état hydrique des fruits en fonction de leur stade de développement (diamètre ou jour après anthèse, à voir) avec l'état hydrique de la plante entière. L'application porte ici sur les options de l'outil d'évaluation des « fenêtres de contamination par l'aflatoxine ». (CIRAD-CERAAS)

4 Cercosporiose et fonctionnement des plantes : ce papier, présentant le bilan de carbone appliqué à l'essai de Nioro et 9 parcelles d'agriculteurs (comparaison de parcelles protégées-non protégées) dans les méthodes, a pour objet de discuter du rôle de la maladie comme

facteur d'ajustement de la durée du cycle de culture, favorable ou défavorable selon l'offre climatique. L'application porte sur l'intégration des maladies dans l'outil d'évaluation des « fenêtres de contamination par l'aflatoxine ». (CIRAD-CERAAS)

« Fenêtres de contamination » : ce papier a pour objet de présenter l'outil d'évaluation des risques de contamination de la culture par l'aflatoxine (bilan hydrique, température de la géocarposphère, modèle de développement de l'arachide) et de discuter de son pouvoir prédictif à partir des 45 parcelles de l'enquête agronomique. (CERAAS-CIRAD)

BIBLIOGRAPHIE

Annerose, D. (1990). Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptaion à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (Arachis hypogea L.) cultivée au Sénégal. Paris, Université Paris VII: 282.

Sinclair, T. R., J. M. Bennett, et al. (1993). "Leaf Nitrogen, Photosynthesis and Radiation Use Efficiency in Peanut." peanut Science **20**: 40-43.

Noilhan, J. and S. Planton (1989). "A simple Parameterization of land surface processes for meteorological models." J. of American Meteorological Society **117**: 536-549.

ANNEXE

ANNEXE

agro Montpellier
Ecole Nationale Supérieure Agronomique

INRA

MODELE DE PRODUCTION DE BIOMASSE PAR UN COUVERT VEGETAL (MONTEITH, 1977)

DESCRIPTION DU MODELE DE MONTEITH

D'après Monteith (1977), la production de biomasse par un couvert végétal se modélise de façon simple, par l'équation suivante :

*Biomasse produite [gMS/m²] = Eb [gMS/Mj] * Ea * Ec * Rg [Mj/m²]*

Avec :

- Rg [Mj/m²] = Rayonnement global en Mégajoules par m² qui arrive sur le couvert ;
- Ec = Efficience climatique. En France, on admet que Ec = 0,48. En multipliant le Rg par Ec, on obtient la fraction de rayonnement efficace pour la photosynthèse. C'est le PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) ;
- Ea = Efficience d'absorption du rayonnement. C'est la fraction du PAR qui est absorbée par le couvert végétal. Ainsi, on a la quantité d'énergie (PAR absorbé) qui rentre dans le système modélisé en multipliant Ea et le PAR. Nous considérerons que **Ea = Ei** (Efficience d'interception du rayonnement) ;
- Eb [gMS/Mj] = Efficience biologique. Eb représente l'efficacité qu'a le couvert végétal à convertir les mégajoules d'énergie absorbés sous forme de rayonnement solaire, en gramme de matière carbonée, la biomasse.

PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE D'UNE SIMULATION DE PRODUCTION DE BIOMASSE SUR UNE CULTURE DE LEGUMINEUSE A GRAINES

La simulation proposée se fera à un ***pas de temps journalier***. De ce fait, chaque terme du modèle doit être renseigné quotidiennement sur la période de calcul.

Rg est une donnée météorologique d'entrée du modèle, elle est fournie par une station de mesure sur le terrain.

Ec est considérée comme constante sur le cycle de culture.

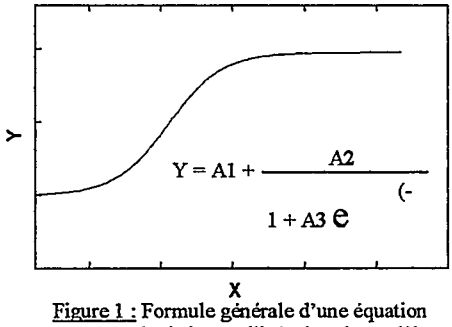

Figure 1 : Formule générale d'une équation logistique utilisée dans le modèle

Pour **Ei** et **Eb**, une équation logistique (figure 1) permet de générer des données journalières. On ajuste cette fonction aux données mesurées d'Ei ou d'Eb en fonction de la somme des températures depuis la levée (détermination du quadruplet (A1,A2,A3,A4) estimant le mieux les données mesurées).
Concernant Eb, on fixe une valeur jusqu'à début floraison, et on applique une logistique sur les données mesurées fournies par la littérature sur l'espèce considérée. Pour affiner la prédiction du modèle, il est possible d'introduire un coefficient correcteur de l'Eb qui est fonction de la température moyenne du jour.

Pour Ei (mesuré avec un *Li-cor*®), on applique la logistique jusqu'à fin floraison puis on impose une décroissance linéaire (pente constante) jusqu'à zéro en 10 à 20 jours selon l'espèce en question (figure 2 (b)).

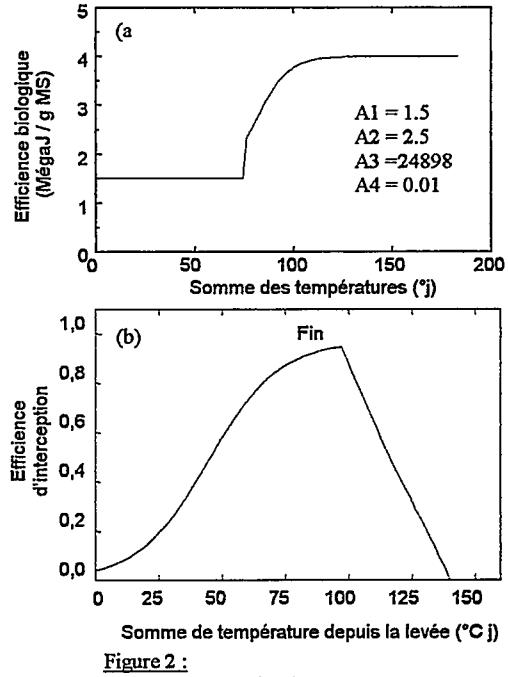

Figure 2 :
(a) Courbe d'Eb simulée et paramètres
(b) Courbe Ei simulée
(Ajustement sur données mesurées)

Il est également possible d'estimer Ei d'après un indice foliaire (LAI pour « Leaf area Index »). L'équation de passage est $Ei = a(1- e^{-kLAI})$ (a étant fonction de la réflectance des feuilles et k étant fonction de la géométrie du couvert). Ce sont alors des données journalières de LAI qu'il faut générer avec une logistique depuis les données mesurées.

LA GOUTTE D'ENCRE
53 Place Thermidor 34000 Montpellier
Tel 04 67 65 30 96 Fax 04 67 65 89 23